



### III-122 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM MODELO ACOPLADO MECÂNICO-BIOLÓGICO PARA AVALIAÇÃO DE RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS

**Gustavo Ferreira Simões<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil (UFMG), Mestre e Doutor em Engenharia Civil (PUC-Rio), Professor Associado do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

**Ricardo Morais Lanes**

Engenheiro Civil (UFMG), Ex-Bolsista de Iniciação Científica vinculado ao Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Escola de Engenharia da UFMG. Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia. Av. do Contorno, 842 / 608 - Centro - Belo Horizonte - MG - CEP: 30110-060 - Brasil - Tel: +55 (31) 3409-1792 - Fax: +55 (31) 3409-1793 - e-mail: [gustavo@etg.ufmg.br](mailto:gustavo@etg.ufmg.br)

#### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a avaliação de recalques em aterros sanitários. O modelo implementado, proposto por Simões (2000), considera a condição unidimensional e possibilita o acoplamento mecânico e biológico do problema. A componente mecânica é formada por uma parcela de recalque imediato, causada pela aplicação de cargas, e outra parcela de recalque de longo prazo causada pelo comportamento viscoso dos resíduos. A segunda componente é resultado dos processos de decomposição biológica dos resíduos. O comportamento dos resíduos é avaliado considerando propriedades de suas frações constituintes, o que permite a análise de problemas onde a composição dos resíduos e os procedimentos operacionais variam ao longo do tempo, permitindo, por exemplo, a simulação da construção em etapas. O aplicativo desenvolvido apresenta interface amigável e possibilita a análise de resultados de forma gráfica. São também apresentados os resultados de simulações de um aterro hipotético, com características típicas de aterros brasileiros.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aterro sanitário, resíduos sólidos urbanos, recalques, modelos.

#### INTRODUÇÃO

A estimativa dos recalques em aterros sanitários é de grande importância pois permite a avaliação da integridade dos seus componentes, tais como camadas de cobertura final e sistemas de drenagem de líquidos e gases, além de possibilitar a avaliação do desempenho desses empreendimentos após o fechamento. A estimativa da evolução dos recalques ao longo do tempo ainda permite a avaliação da vida útil dos aterros, aspecto importante no contexto do gerenciamento dos resíduos sólidos. Além disto, a ocorrência de recalques modifica os pesos específicos das camadas e altera a geometria desses maciços, podendo, em casos extremos, comprometer a estabilidade dos aterros sanitários.

Dados da literatura ressaltam que os valores das deformações observados em aterros sanitários se situam entre 10% a 40%, podendo atingir até 50% da sua altura inicial e a maioria deles ocorrem nos primeiros anos após a disposição, diminuindo a velocidade dos recalques nos anos subsequentes.

Diversos modelos para estimativa de recalques em aterros sanitários têm sido propostos. Esses modelos, sumarizados em Liu *et al.* (2006), podem ser divididos nas seguintes categorias: (i) modelos baseados nas expressões clássicas da teoria de adensamento da mecânica dos solos; (ii) modelos reológicos; (iii) modelos que incorporam a biodegradação dos resíduos; (iv) modelos de regressão, baseados em expressões logarítmicas, hiperbólicas e bi-lineares.

Dentre os modelos que incorporam a parcela de biodegradação dos resíduos, destacam-se os propostos por Diaz *et al.* (1995) and Espinace *et al.* (1999), denominado Modelo Meruelo; Marques *et al.* (2003), denominado Modelo Compósito, e o proposto por Simões (2000), denominado Modelo Acoplado Mecânico e Biológico.



Neste trabalho, é apresentada a implementação computacional do modelo acoplado mecânico e biológico proposto por (Simões, 2000). A avaliação da influência da degradação biológica nos recalques de um aterro sanitário hipotético é apresentada, por meio de duas simulações, uma contemplando os efeitos mecânicos e biológicos no recalque total do aterro e outra, apenas os efeitos mecânicos.

## MODELO DE ESTIMATIVA DE RECALQUES

O modelo proposto por Simões (2000) é um modelo simples unidimensional, no qual o recalque resulta de duas componentes: uma devida ao comportamento mecânico e outra à degradação biológica. A componente mecânica é composta de um recalque imediato, no qual a aplicação de cargas resulta na redução da macroporosidade e na drenagem de líquidos e gases, e uma componente de longo prazo, associado à deformação lenta da estrutura do resíduo. A componente biológica resulta dos processos de decomposição das frações orgânicas no interior da massa de resíduos, onde a contínua transferência de massa entre a fase sólida e as fases líquida e gasosa, causa uma redução de volume. Admite-se, no modelo proposto, que os parâmetros utilizados na avaliação das duas componentes não variam com o tempo.

O comportamento dos resíduos é avaliado a partir das propriedades de suas frações constituintes, possibilitando a análise de problemas onde a composição e os procedimentos operacionais variem com o tempo. O modelo também considera a construção em etapas.

A avaliação da componente biológica dos recalques é baseada na perda de massa. Isso possibilita o acoplamento com o comportamento mecânico, uma vez que é possível avaliar a variação dos pesos específicos de cada camada do aterro ao longo do tempo.

Adotando-se o princípio da superposição, o modelo é baseado em uma análise numérica da deformação para cada instante, considerando as três componentes dos recalques. Analiticamente, tem-se:

$$\Delta H_{total} = \Delta H_{carregamento} + \Delta H_{comportamento\ viscoso} + \Delta H_{biodegradação} \quad \text{Equação (1)}$$

De maneira sucinta, são apresentadas as componentes de cada recalque para a elaboração do algoritmo. Maiores detalhes podem ser encontrados em Simões (2000).

### • Componente Mecânica do Recalque Imediato

A componente de deformação mecânica imediata está associada à tensão vertical causada pelo peso próprio das novas camadas do aterro. Analiticamente, tem-se:

$$\Delta H_1 = H_o \cdot C_R \cdot \log\left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o}\right) \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

$\Delta H_1$  = recalque imediato da camada de espessura inicial  $H_o$ ;

$P_o$  = tensão total vertical inicial;

$\Delta P$  = acréscimo de tensão total vertical;

$C_r$  = coeficiente de compressão imediata.

### • Componente Mecânica do Comportamento Viscoso dos Resíduos

Componente do recalque devida ao comportamento viscoso dos resíduos, representa as deformações lentas ou fluência dos mesmos, sob a ação de carga constante. Analiticamente, tem-se:

$$\Delta H_2 = H_o \cdot C_\alpha \cdot \log\frac{t}{t_i} \quad \text{Equação (3)}$$

em que:



$\Delta H_2$  = recalque da camada de espessura inicial  $H_0$  devido ao componente viscoso do material;

$C\alpha$  = coeficiente de compressão viscoso;

$t$  = tempo;

$t_1$  = instante inicial.

#### • Componente Biológica

A componente biológica está relacionada ao recalque causado pela atividade dos microorganismos decompositores da matéria orgânica. Trata-se de uma simplificação dos complexos processos biológicos existentes no interior do aterro.

A sequência de cálculos envolve inicialmente a determinação das perdas de massa de cada fração constituinte em cada instante da análise, segundo a Equação 4.

$$\Delta M_{ij}(t) = M_{ij0} \cdot \left(1 - e^{-k_{ij}(t-t_0)}\right) \quad \text{Equação (4)}$$

em que:

$\Delta M_{ij}$  = variação da massa potencialmente biodegradável da fração constituinte  $i$  na camada  $j$ ;

$M_{ij0}$  = massa inicial potencialmente biodegradável da fração constituinte  $i$  na camada  $j$ ;

$k_{ij}$  = taxa de biodegradação da fração constituinte  $i$  na camada  $j$ ;

$t_0$  = tempo inicial.

Para a aplicação da Equação (4), o conceito de Biodegradabilidade-Potencial ( $BP$ ) é importante porque como  $M_{ij0}$  refere-se apenas a massa de resíduo potencialmente biodegradável, nem toda a massa de resíduo presente no aterro está sujeita aos efeitos de decomposição. Daí surge:

$$M_{ij0} = BP \times M_{ijt} \quad \text{Equação (5)}$$

em que:

$BP$  = Biodegradabilidade-Potencial;

$M_{ijt}$  = massa total do material  $i$  da camada  $j$ ;

$M_{ij0}$  = massa inicial potencialmente biodegradável da fração constituinte  $i$  na camada  $j$ .

Em seguida a perda de massa é transformada em recalques, são determinadas as novas alturas e os novos pesos específicos das camadas, conforme metodologia apresentada em Simões (2000) e Simões e Campos (2002). As novas alturas e pesos específicos de cada camada são utilizados na determinação dos novos estados de tensão no instante seguinte, que são empregados na expressão de cálculo da parcela de recalque causado pelos novos carregamentos (Equação 2).

## RESULTADOS

#### • Implementação Computacional

Desenvolvido em linguagem Visual Basic, o aplicativo apresenta uma interface amigável e interativa, o que torna simples a utilização do programa. A interação com o usuário é rápida e proporciona uma série de apresentações dos resultados, os quais podem ser obtidos em forma gráfica ou em arquivos de dados, para utilização em outros programas comerciais.

Os dados de entrada são divididos em:

- Sequência construtiva: tempos de construção, alturas, espessuras e pesos específicos de cada alteamento; espessura das camadas de cobertura intermediárias;
- Parâmetros gerais dos resíduos em cada alteamento: composição gravimétrica e taxas de biodegradação de cada fração constituinte; coeficientes de compressibilidade imediato e viscoso dos resíduos.

O aplicativo desenvolvido disponibiliza os seguintes resultados, em função do tempo:

- Deformações após o fechamento do aterro;
- Evolução dos pesos específicos das camadas do aterro;
- Estimativa das alturas;
- Massa de resíduos remanescente da atividade biológica;
- Previsão das componentes do recalque isoladamente e em conjunto.

As Figuras 1 e 2 apresentam exemplos da interface do aplicativo.

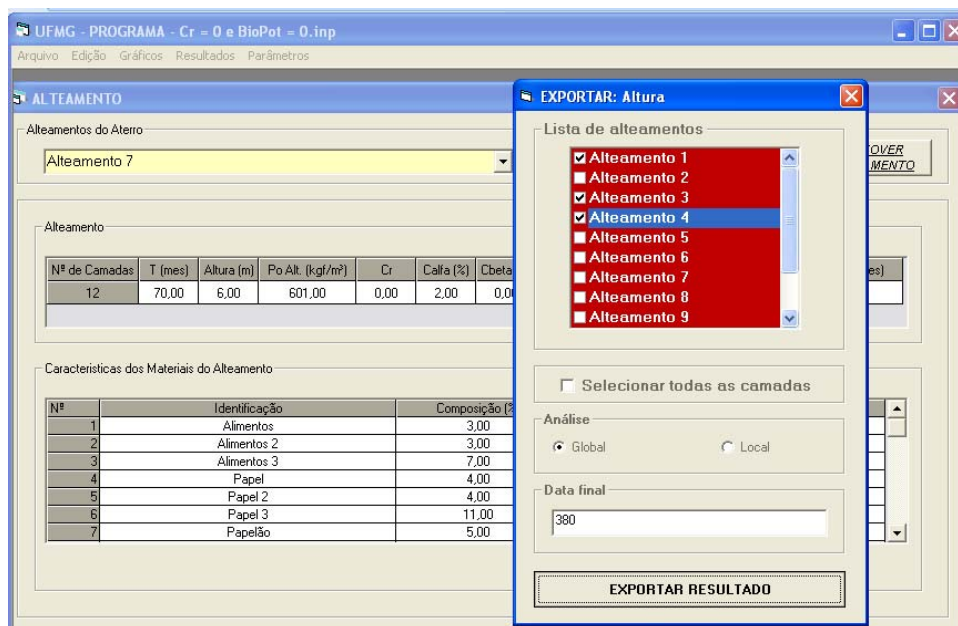


Figura 1 – Exemplo de interface do aplicativo

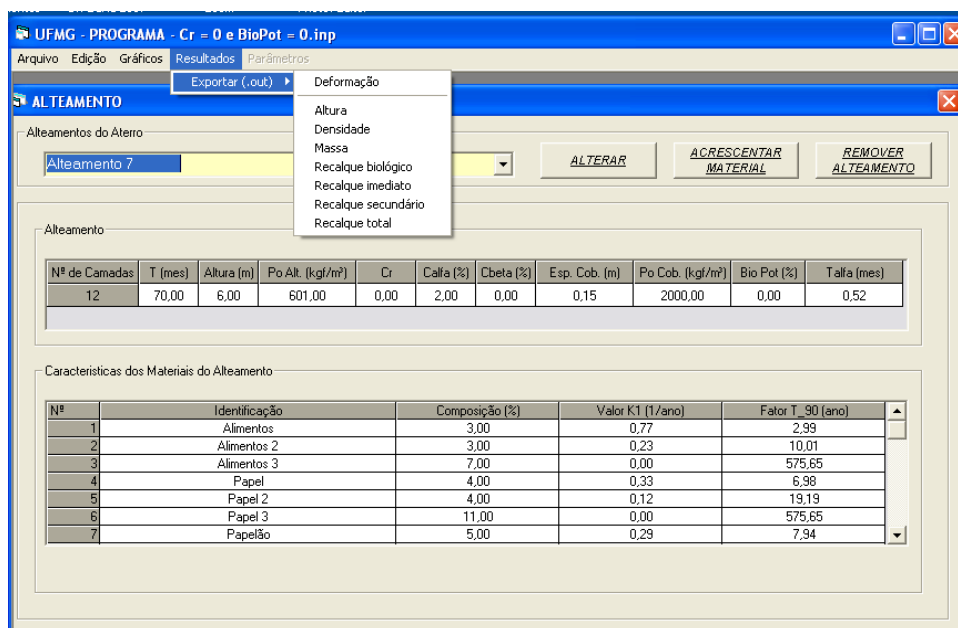


Figura 2 – Exemplo de interface do aplicativo



### • Exemplo de Aplicação

Com a finalidade de avaliar a influência da biodegradação na altura final de um aterro sanitário 20 anos após o início das atividades de alteamento, foram simulados dois casos de aterros com resíduos sólidos urbanos de composição gravimétrica típica dos municípios brasileiros. O primeiro caso contempla apenas a influência do efeito mecânico no recalque total e o segundo, a influência dos efeitos mecânicos e biológicos simultaneamente. A Tabela 1 apresenta algumas composições gravimétricas típicas e suas respectivas velocidades de degradação estimada para a utilização da Equação (4).

**Tabela 1 – Composições gravimétricas e respectivos coeficientes  $K_{ij}$  estimado**

TIPOS DE MATERIAIS	COMPOSIÇÃO MAIS DEGRADÁVEL (%)	COMPOSIÇÃO MENOS DEGRADÁVEL (%)	COEFICIENTE $K_{ij}$ (ANO <sup>-1</sup> )
Alimentos, papel, papelão, jardim, rejeitos e outros materiais orgânicos com rápida degradação.	40	20	0,46
Alimentos, madeira, podas e outros materiais com velocidade de degradação média.	20	20	0,15
Tecidos, borracha, couro, madeira, plástico e outros materiais com degradação lenta.	20	20	0,05
Lata, vidro, alumínio, solo, cinza, entulho e outros materiais inertes.	20	40	0,00

\* OBS: O COEFICIENTE  $K_{ij}$  É A TAXA DE BIODEGRADAÇÃO DA FRAÇÃO CONSTITUINTE  $i$  NA CAMADA  $j$ .

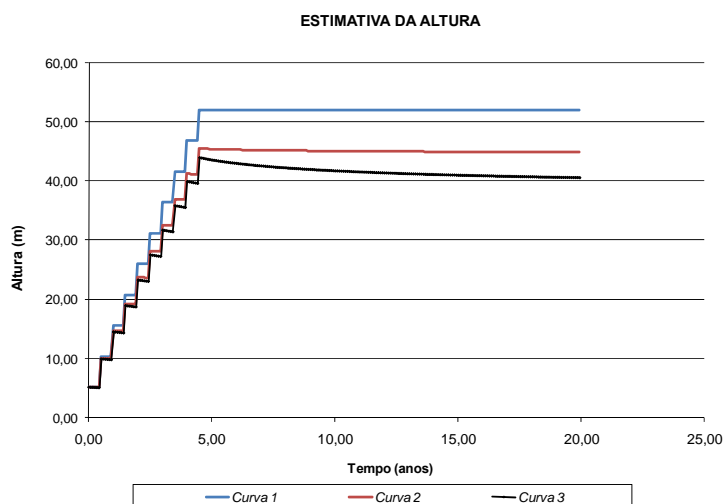
Em ambos os casos simulados, foram considerados 5 anos de operação e 10 camadas de alteamentos instaladas durante este período, ou seja, uma camada a cada seis meses. Cada camada apresenta 5m de espessura, o que totaliza um volume final de 50m<sup>3</sup> de resíduo depositado por m<sup>2</sup>, desde o início da operação. Além disto, adotaram-se para cada camada de alteamento os seguintes parâmetros necessários para as simulações:

- Altura inicial de cada camada  $H_0 = 5\text{m}$ ;
- Peso específico inicial do resíduo  $\gamma_0 = 8,0 \text{ kN/m}^3$ ;
- Peso específico inicial do material de cobertura  $\gamma_s = 20,0 \text{ kN/m}^3$ ;
- Espessura inicial da camada de cobertura  $h_0 = 0,20 \text{ m}$ ;
- Coeficiente de compressão imediato:  $C_r = 0,15$ ;
- Coeficiente de compressão viscoso:  $C_\alpha = 1,5\%$ ;
- Biodegradabilidade-Potencial:  $BP = 0\%$  e  $BP = 40\%$ , para o primeiro e segundo caso, respectivamente;
- Foi adotada a composição de RSU mais degradável, de acordo com a Tabela 1.

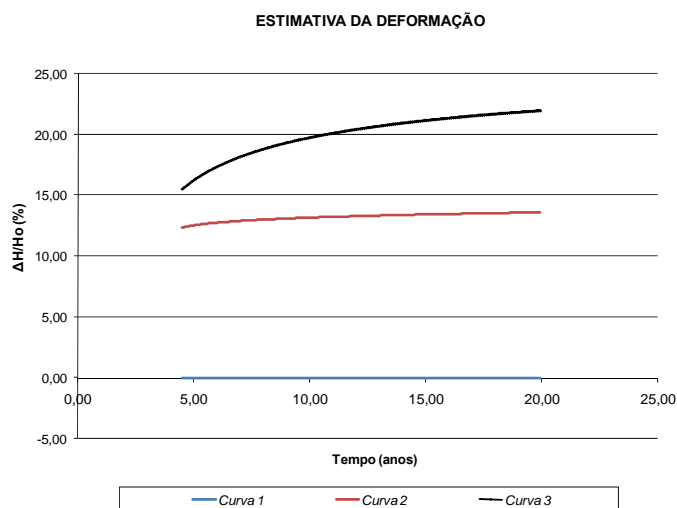
Para a interpretação dos resultados das Figuras 3 a 6, tem-se:

- Curva 1: Correspondente aos resultados isentos de deformações;
- Curva 2: Correspondente aos resultados obtidos apenas para o recalque mecânico ( $BP = 0\%$ );
- Curva 3: Correspondente aos resultados obtidos para o recalque mecânico e biológico ( $BP = 40\%$ ).

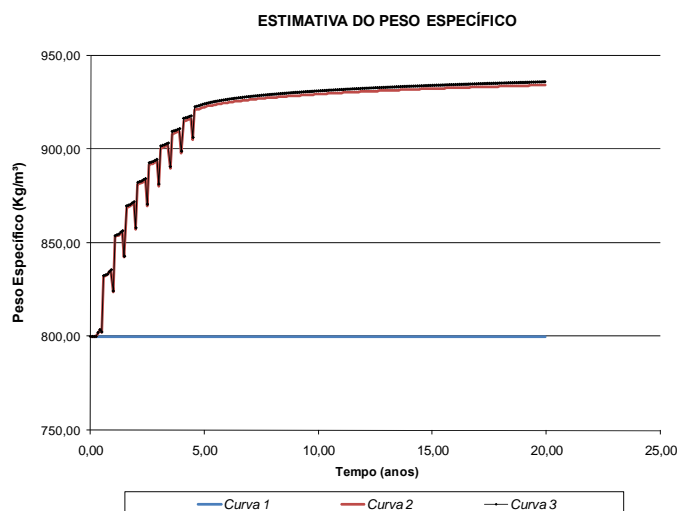
Embora utilizando dados de entrada hipotéticos, os resultados mostram a clara influência da componente biológica nos recalques. As deformações observadas para os dois casos foram de 13% e 22%, respectivamente. Observa-se também um aumento no peso específico dos resíduos com o tempo, conforme mostrado nas Figuras 5 e 6.



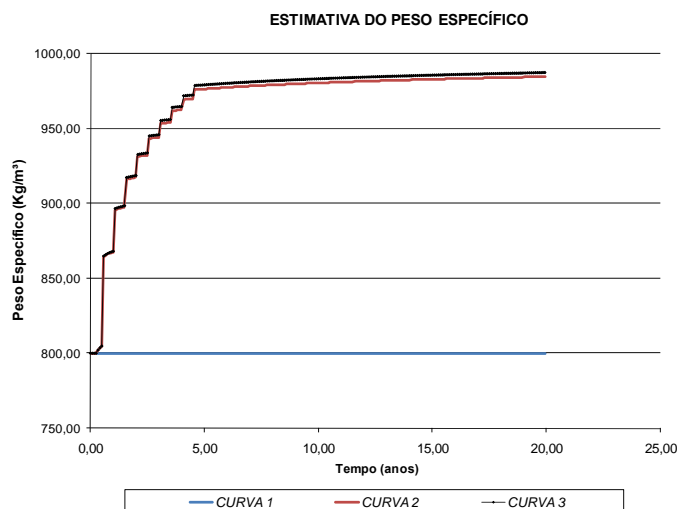
**Figura 3 – Estimativa da altura do aterro pelo tempo**



**Figura 4 – Estimativa da deformação do aterro pelo tempo**



**Figura 5 – Evolução do peso específico do Aterro**



**Figura 6 – Evolução do peso específico da primeira camada de aterramento**

## CONCLUSÕES

A ferramenta computacional desenvolvida mostrou-se versátil e amigável, possibilitando a realização de análises de sensibilidade do modelo aos parâmetros envolvidos, bem como a estimativa de faixas de recalques na condição de longo prazo.

A simulação realizada com parâmetros típicos evidenciou a influência da biodegradação, permitindo inferir de maneira rápida as faixas de variação dos recalques e das alturas sob cada condição, o que auxilia na análise da vida útil do aterro.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica ao segundo autor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DIAZ, J. G. L.; NAREA, M. S.; SANCHEZ-ALCITURRI, J. M.; IBARRA, A. A.; MONZON, I.T.; GONZALEZ, J. P.; LAMIA, M. F. (1995). "Estimating material losses in sanitary landfills through biological degradation". *Proceedings, 5th International Landfill Symposium -Sardinia 95*, Cagliari, Italy, p. 203-208;
2. ESPINACE, R.; PALMA, G.; SANCHEZ-ALCITURRI, J. M. (1999). Experiencias de aplicacion de modelos para la determinacion de los asentamientos de rellenos sanitarios. *Proceedings, XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Foz do Iguaçu, Brasil (in Spanish).
3. LIU, C. N.; CHEN, R. H.; CHEN, K. S. (2006) "Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement". *Waste Management & Research*, v. 24:1, p. 80-91.
4. MARQUES, A. C. M.; FILZ, G. M.; VILAR, O. M. (2003) "Composite Compressibility Model for Municipal Solid Waste". *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, v. 129:4, p. 372-378.
5. SIMÕES, G. F.; CAMPOS, T. M. P. (2002) "A coupled mechanical and biological model to estimate settlements in solid waste landfills". *Proceedings, 4th International Symposium on Environmental Geotechnics*. Rio de Janeiro. Brazil. Environmental Geotechnics. Rotterdam : A. A. Balkema, 2002. v. 1. p. 283-288
6. SIMÕES, G.F. (2000) – *Modelo para a avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos*. Tese de Doutorado, PUC–Rio.